



Peran Mikroplastik Sebagai Hotspot Biofilm Dan Reservoir Gen Resistensi Antibiotik Pada Instalasi Pengolahan Air Limbah: Tinjauan Literatur

Cicik Sudaryantiningsih¹, Yonathan Suryo Pambudi²

^{1,2} Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Teknologi Solo

¹mamanyaaldo@gmail.com, ²pambudiysp@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan menganalisis peran mikroplastik sebagai hotspot biofilm dan reservoir gen resistensi antibiotik pada instalasi pengolahan air limbah atau IPAL. Fokus kajian diarahkan pada mekanisme pembentukan biofilm, faktor yang memengaruhi kemampuan mikroplastik membawa *antibiotic-resistant bacteria*, *antibiotic resistance genes*, patogen, dan mobile genetic elements, serta implikasinya terhadap pengendalian resistensi antibiotik dari perspektif teknik lingkungan. Metode penelitian menggunakan literature review berbasis 37 artikel jurnal internasional bereputasi terindeks Scopus *Quartile* 1. Data dianalisis melalui sintesis tematik dengan mengelompokkan temuan berdasarkan tiga fokus utama, yaitu mekanisme *plastisphere*, faktor material dan lingkungan, serta strategi pengendalian risiko pada IPAL. Unit analisis meliputi jenis mikroplastik, proses biofilm, ARG, ARB, MGE, patogen, unit pengolahan, dan pendekatan mitigasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mikroplastik dapat menjadi substrat aktif bagi pembentukan *plastisphere* melalui adhesi mikroba, *eco-corona*, produksi *extracellular polymeric substances*, dan *horizontal gene transfer*. Kemampuan mikroplastik sebagai reservoir ARG dipengaruhi oleh jenis polimer, ukuran, bentuk, aging, kekasaran permukaan, hidrofobisitas, antibiotik, logam berat, disinfektan, *Chemical Oxygen Demand* (COD), TP, salinitas, dan waktu paparan. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pengendalian IPAL perlu diperluas dari parameter konvensional menuju pemantauan mikroplastik berbiofilm, ARG, ARB, MGE, dan patogen melalui pendekatan multi-barrier.

Kata Kunci: Mikroplastik, *Plastisphere*, Biofilm, Gen Resistensi Antibiotik, IPAL.

1. Pendahuluan

Instalasi pengolahan air limbah atau IPAL selama ini banyak dipahami sebagai sistem teknis untuk menurunkan beban pencemar konvensional, seperti *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Total Suspended Solids* (TSS), nutrisi, dan indikator mikrobiologi. Namun, perkembangan kajian terbaru menunjukkan bahwa IPAL juga berperan sebagai ekosistem mikroba yang kompleks, padat, dan penuh tekanan selektif. Di dalam sistem ini, berbagai kontaminan seperti antibiotik, logam berat, disinfektan, bahan organik, mikropolutan, *antibiotic-resistant bacteria* atau ARB, *antibiotic resistance genes* atau ARG, serta *mobile genetic elements* atau MGE dapat hadir secara bersamaan. Drane et al. (2024) menempatkan ARG sebagai *contaminant of emerging concern* karena dapat berpindah dari air limbah menuju lingkungan penerima melalui jalur *One Health*. Uluseker et al. (2021) juga menjelaskan bahwa *wastewater treatment plant* (WWTP) menerima antibiotik, ARB, ARG, mikropolutan, dan bahan organik dari berbagai sumber aktivitas manusia. Sambaza dan Naicker (2023) menegaskan bahwa air limbah dapat menjadi lingkungan yang mendukung transfer gen resistensi karena adanya bakteri, antibiotik, logam berat, pH, suhu, dan tekanan selektif lain. Zhao, Yu, dan Zhang (2023) memperkuat pandangan tersebut dengan menunjukkan bahwa resistensi antibiotik di IPAL perkotaan tidak hanya dipicu oleh antibiotik, tetapi juga oleh mikroplastik, logam berat, disinfektan, *personal care products*, obat non-antibiotik, dan polutan lain. Sejalan dengan itu, Joo et al. (2025) menjelaskan bahwa *plastisphere* menjadi habitat penting yang berkaitan dengan keberadaan *antibiotic resistance genes* dan *antibiotic-resistant bacteria*, karena permukaan

Peran Mikroplastik Sebagai Hotspot Biofilm Dan Reservoir Gen Resistensi Antibiotik Pada Instalasi Pengolahan Air Limbah: Tinjauan Literatur

mikroplastik dapat mendukung pembentukan biofilm dan kolonisasi mikroba. Tuvo et al. (2023) menegaskan bahwa air limbah, terutama air limbah rumah sakit, perlu mendapat perhatian karena dapat memperburuk penyebaran mikroplastik, bakteri resisten antibiotik, dan gen resistensi antibiotik di lingkungan. Wu et al. (2024) menambahkan bahwa mikroplastik dapat bertindak sebagai vektor resistensi antibiotik melalui interaksi dengan patogen, logam berat, antibiotik, *pharmaceuticals*, dan *personal care products*. Dengan demikian, IPAL tidak lagi cukup dipahami sebagai unit penurunan pencemar konvensional, tetapi perlu dilihat sebagai ruang ekologis tempat mikroplastik, biofilm, dan resistensi antibiotik saling berinteraksi.

Mikroplastik menjadi isu penting dalam konteks IPAL karena partikel ini tidak hanya berfungsi sebagai pencemar fisik, tetapi juga sebagai substrat aktif bagi kolonisasi mikroba. Permukaan mikroplastik dapat menjadi tempat pembentukan biofilm yang dikenal sebagai *plastisphere*. Zhang, Dong, Zhang, Ma, dan Liu (2026) menjelaskan bahwa mikroplastik dapat menciptakan *niche* ekologis baru yang menampung komunitas mikroba berbeda dari air, sedimen, atau substrat alami. Bocci et al. (2024) menunjukkan bahwa *plastisphere* dapat mengandung prokariota, eukariota, patogen potensial, pembentuk biofilm, MGE, dan ARG. Perveen et al. (2022) juga menegaskan bahwa biofilm mikroplastik berbeda dari komunitas mikroba di air sekitarnya dan dapat membawa ARB, ARG, patogen, serta MGE. Siddique et al. (2025) menambahkan bahwa *eco-corona* pada permukaan mikroplastik dapat memfasilitasi kolonisasi mikroba dan horizontal gene transfer. Jia et al. (2024) menjelaskan bahwa biofilm mikroplastik terbentuk melalui tahap adhesi, akumulasi *eco-corona*, produksi *extracellular polymeric substances*, dan pelepasan mikroba. Michaelis dan Grohmann (2023) memberi dasar teoritis bahwa biofilm menjadi ruang yang efektif untuk horizontal gene transfer karena sel bakteri hidup berdekatan dalam matriks pelindung. Oleh karena itu, mikroplastik dalam IPAL perlu dipahami sebagai media biologis yang dapat memperkuat akumulasi ARB, ARG, patogen, dan MGE.

Bukti empiris dari berbagai penelitian menunjukkan bahwa mikroplastik dapat menjadi hotspot biofilm dan reservoir gen resistensi antibiotik, meskipun efeknya bergantung pada kondisi proses dan lingkungan. Bydalek et al. (2023) menunjukkan bahwa mikroplastik dalam proses *wastewater treatment* yang dilengkapi *constructed wetland* dapat dikolonisasi biofilm, patogen, dan gen AMR, meskipun beban AMR dapat turun setelah pengolahan. Perveen et al. (2023) menemukan bahwa biofilm mikroplastik dari efluen WWTP dapat mengakumulasi ARB, ARG, dan integron, dengan dinamika yang dipengaruhi oleh waktu kolonisasi dan *total organic carbon*. Pham et al. (2021) membuktikan bahwa mikroplastik PE dan PS dalam *activated sludge* dapat memperkaya *sul1*, *sul2*, *intI1*, serta taksa patogen dan ARB. Bhardwaj et al. (2025) menjelaskan bahwa WWTP memang dapat mengurangi mikroplastik dalam jumlah besar, tetapi biofilm mikroplastik tetap dapat menjadi reservoir patogen dan resistensi antimikroba. Zhang, Liu, Ye, et al. (2026) menunjukkan bahwa unit disinfeksi dapat menurunkan mikroba, ARG, dan MGE pada *wastewater*, tetapi dampaknya lebih kecil terhadap *plastisphere*. Witsø et al. (2025) juga menunjukkan bahwa *plastisphere* dari air limbah memiliki resistome lebih beragam dibandingkan *plastisphere* dari air tawar. Maday et al. (2024) menambahkan bahwa waktu paparan, kedalaman, dan kondisi kolam maturasi IPAL dapat memengaruhi struktur komunitas biofilm pada plastik. Tran et al. (2025) memperjelas bahwa jenis mikroplastik, aging buatan, lokasi IPAL, inlet, dan outlet dapat menghasilkan profil bakteri dan ARG yang berbeda.

Alasan pentingnya penelitian ini dilakukan terletak pada kebutuhan untuk menyatukan bukti yang masih tersebar antara kajian mikroplastik, biofilm, ARG, dan proses IPAL. Zhao, Li, dan Li (2024) menjelaskan bahwa mikroplastik dapat menyerap antibiotik, logam berat, dan kontaminan organik melalui sifat polimer, ukuran,

bentuk, hidrofobisitas, interaksi elektrostatis, gaya *van der Waals*, dan mekanisme lain. Hongjin et al. (2025) menempatkan mikroplastik, antibiotik, ARB, dan ARG sebagai bentuk pencemaran gabungan yang dapat memperpanjang retensi antibiotik dan memperkuat penyebaran gen resistensi. Tang dan Li (2024) menegaskan bahwa aging mikroplastik dapat mengubah luas permukaan, gugus fungsi, morfologi, kekasaran, dan kemampuan sorpsi, sehingga interaksi mikroplastik dengan antibiotik, biofilm, dan ARG semakin kuat. Gross et al. (2025) membuktikan bahwa ukuran, komposisi, konsentrasi, dan sifat permukaan mikroplastik dapat memengaruhi pembentukan biofilm dan *multidrug resistance* pada bakteri model. Balta et al. (2025) memperluas penjelasan tersebut melalui hubungan mikroplastik, logam berat, *co-selection*, dan *cross-resistance*. Piergiacomo et al. (2023) menempatkan mikroplastik, *xenobiotic contaminants*, AMR, dan logam berat dalam kerangka One Health. Zadjelovic et al. (2023) menunjukkan bahwa paparan antibiotik dapat meningkatkan ARG tertentu pada *plastisphere* sungai. Joannard dan Sanchez-Cid (2024) menegaskan pentingnya mobilome dalam respons *plastisphere* terhadap polusi antibiotik subletal. Dengan dasar tersebut, penelitian ini penting karena dapat menjelaskan bahwa mikroplastik menjadi reservoir ARG melalui gabungan sifat material, biofilm, tekanan selektif, dan elemen genetik bergerak.

Hubungan penelitian ini dengan literatur terdahulu terletak pada upaya menyusun sintesis yang lebih terarah dari perspektif teknik lingkungan. Kajian sebelumnya telah menunjukkan bahwa risiko mikroplastik berbiofilm tidak berhenti di dalam IPAL. Rossi et al. (2025) menunjukkan bahwa plastik di ekosistem akuatik dapat memperkaya ARG dan membawa risiko ke hewan akuatik, produk perikanan, serta rantai makanan. Alfonsi et al. (2025) memberikan bukti bahwa *plastisphere* sungai dapat menjadi reservoir bakteri resisten antibiotik, termasuk bakteri *multidrug resistant* dan gen yang relevan secara klinis. Cholewińska et al. (2025) menunjukkan bahwa kehadiran mikroplastik dapat meningkatkan kelimpahan patogen dan ARG pada air serta sedimen setelah inkubasi singkat. Raju et al. (2025) menekankan perlunya surveilans ARG pada IPAL karena sistem air limbah dapat menjadi simpul penting penyebaran AMR. Wang et al. (2024) menunjukkan bahwa keragaman mikroplastik dapat meningkatkan kelimpahan ARG, *virulence factor genes*, dan MGE, meskipun konteks penelitiannya berada pada tanah. Tulloch et al. (2024) memberi catatan kritis bahwa plastik tidak selalu memperkaya ARG ketika berpindah dari efluen WWTP ke air tawar, air payau, dan laut. Catatan kritis ini penting karena menunjukkan bahwa peran mikroplastik sebagai *hotspot* biofilm dan reservoir ARG bersifat kontekstual, bukan berlaku sama pada semua kondisi.

Berdasarkan uraian tersebut, tujuan penelitian ini adalah menganalisis peran mikroplastik sebagai hotspot biofilm dan reservoir gen resistensi antibiotik pada IPAL melalui tinjauan literatur. Penelitian ini bertujuan menjelaskan mekanisme pembentukan biofilm pada permukaan mikroplastik, termasuk peran *plastisphere*, adhesi mikroba, *eco-corona*, *extracellular polymeric substances*, HGT, ARB, ARG, patogen, dan MGE. Penelitian ini juga bertujuan mengidentifikasi faktor yang memengaruhi kemampuan mikroplastik sebagai hotspot biofilm dan reservoir ARG, seperti jenis polimer, ukuran, bentuk, aging, kekasaran permukaan, hidrofobisitas, antibiotik, logam berat, disinfektan, COD, TP, salinitas, dan waktu paparan. Selain itu, penelitian ini bertujuan merumuskan implikasi keberadaan mikroplastik berbiofilm terhadap penyebaran resistensi antibiotik serta strategi pengendaliannya dari perspektif teknik lingkungan. Strategi tersebut mencakup peningkatan efisiensi removal mikroplastik, penguatan pengolahan lanjutan, evaluasi efektivitas disinfeksi, monitoring ARG, dan pendekatan *multi-barrier* sebagaimana juga diarahkan oleh Brouwir et al. (2025). Rumusan masalah penelitian ini adalah bagaimana mekanisme pembentukan biofilm pada permukaan mikroplastik berperan dalam akumulasi ARB, ARG, patogen, dan MGE. Rumusan masalah kedua adalah faktor apa saja yang memengaruhi kemampuan

DOI: <https://doi.org/10.69693/ijmst.v4i2.9445>

Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

mikroplastik sebagai hotspot biofilm dan reservoir gen resistensi antibiotik berdasarkan bukti penelitian terdahulu. Rumusan masalah ketiga adalah apa implikasi keberadaan mikroplastik berbiofilm terhadap penyebaran resistensi antibiotik serta strategi pengendaliannya berdasarkan perspektif teknik lingkungan. Dengan rumusan tersebut, penelitian ini diharapkan memberi kontribusi konseptual dan praktis bagi penguatan kajian mikroplastik, biofilm, resistome, dan pengelolaan IPAL secara lebih terpadu.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain *literature review* dengan pendekatan sintesis tematik-kritis untuk menjelaskan peran mikroplastik sebagai hotspot biofilm dan reservoir gen resistensi antibiotik pada IPAL. Data penelitian bersumber dari 37 artikel jurnal internasional bereputasi terindeks Scopus *Quartile* 1 yang telah dipilih karena relevan dengan tema mikroplastik, *plastisphere*, biofilm, ARB, ARG, MGE, patogen, IPAL, wastewater treatment, dan strategi pengendalian berbasis teknik lingkungan. Sampel penelitian bukan manusia atau organisme uji secara langsung, melainkan dokumen ilmiah berupa artikel empiris, artikel *review*, *mini-review*, dan *systematic literature search* yang membahas hubungan mikroplastik, biofilm, dan resistensi antibiotik. Unit analisis dalam penelitian ini adalah temuan utama, metode, variabel, konteks lingkungan, jenis mikroplastik, target gen, faktor pemicu, keterbatasan, dan korelasi tiap artikel dengan fokus penelitian. Instrumen penelitian berupa lembar ekstraksi data berbentuk matriks yang memuat judul artikel, lokasi penelitian, penulis, tahun, insight utama, teori atau kerangka yang digunakan, metode penelitian, hasil penelitian, keterbatasan, dan korelasi dengan penelitian yang dilakukan, sebagaimana struktur tabel literatur yang telah disusun dalam dokumen penelitian. Prosedur pengumpulan data dilakukan melalui penelusuran dan seleksi artikel berdasarkan kesesuaian topik, reputasi jurnal, indeks Scopus *Quartile* 1, keterkaitan dengan IPAL atau lingkungan air limbah, serta ketersediaan informasi tentang mikroplastik, biofilm, ARG, ARB, patogen, dan MGE. Artikel yang lolos seleksi kemudian dibaca penuh, diberi kode, dan diekstraksi ke dalam matriks untuk memastikan setiap temuan dapat dilacak kembali ke sumbernya. Analisis data dilakukan dengan mengelompokkan artikel berdasarkan tiga fokus sintesis, yaitu mekanisme pembentukan biofilm, faktor yang memengaruhi mikroplastik sebagai reservoir ARG, serta implikasi dan strategi pengendalian dari perspektif teknik lingkungan. Keragaman metode dalam artikel terdahulu, seperti *mesocosm*, *microcosm*, qPCR, 16S rRNA *sequencing*, *metagenomics*, MinION *sequencing*, *co-occurrence network*, dan *review*, dianalisis untuk membandingkan kekuatan serta batasan bukti yang tersedia. Hasil analisis kemudian disintesis secara naratif dengan menautkan konsep *plastisphere*, *eco-corona*, EPS, HGT, *co-selection*, aging mikroplastik, disinfeksi, *effluent*, *sludge*, dan pendekatan *multi-barrier*. Pendekatan ini dipilih agar penelitian dapat direplikasi oleh peneliti lain melalui penggunaan kriteria artikel yang sama, format ekstraksi data yang sama, dan tiga kategori sintesis yang sama.

3. Hasil Dan Pembahasan

a. Mekanisme Mikroplastik Sebagai Hotspot Biofilm Dan Reservoir ARG

Hasil sintesis menunjukkan bahwa mekanisme utama mikroplastik sebagai hotspot biofilm dan reservoir gen resistensi antibiotik dimulai dari terbentuknya *plastisphere* pada permukaan mikroplastik. *Plastisphere* muncul karena permukaan mikroplastik menyediakan ruang kolonisasi bagi komunitas mikroba yang berbeda dari komunitas mikroba pada air, sedimen, dan substrat alami. Zhang, Dong, Zhang, Ma, dan Liu (2026), Bocci et al. (2024), Perveen et al. (2022), Siddique et al. (2025), dan Jia et al. (2024) menunjukkan bahwa *plastisphere* dapat memuat prokariota, eukariota, patogen potensial, bakteri pembentuk biofilm, ARG, ARB, dan *mobile genetic*

DOI: <https://doi.org/10.69693/ijmst.v4i2.9445>

Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

elements. Tahap pembentukan biofilm berlangsung melalui adhesi mikroba, akumulasi *eco-corona*, produksi *extracellular polymeric substances*, pematangan komunitas biofilm, dan pelepasan mikroba. Michaelis dan Grohmann (2023) memperjelas bahwa biofilm menjadi ruang yang mendukung horizontal gene transfer karena sel bakteri berada dalam jarak dekat dan terlindungi oleh matriks EPS. Dalam kondisi tersebut, gen resistensi dapat berpindah melalui transformasi, transduksi, dan konjugasi, terutama ketika gen berada pada *plasmid*, *integron*, *transposon*, ICEs, atau elemen genetik bergerak lain. Milani et al. (2024) juga mendukung mekanisme ini melalui bukti transfer gen tetM pada sistem biofilm yang berkaitan dengan mikroplastik. Dengan demikian, hasil penelitian ini menegaskan bahwa mikroplastik bukan hanya partikel pencemar pasif, melainkan mikrohabitat aktif yang dapat mempertemukan bakteri, patogen, ARG, MGE, dan tekanan selektif dalam satu ruang kecil.

Temuan tersebut penting karena mekanisme biofilm menjelaskan mengapa mikroplastik dapat mempertahankan ARG lebih baik dibandingkan mikroba bebas di air limbah. Biofilm memberi perlindungan terhadap perubahan lingkungan, disinfektan, radiasi, keterbatasan nutrisi, dan tekanan kimia lain. Zhao, Li, dan Li (2024) menjelaskan bahwa mikroplastik dapat menyerap antibiotik, logam berat, dan kontaminan organik melalui sifat polimer, ukuran, bentuk, hidrofobisitas, interaksi elektrostatis, gaya *van der Waals*, dan interaksi kimia lain. Hongjin et al. (2025) menempatkan mikroplastik, antibiotik, ARB, dan ARG sebagai pencemaran gabungan yang dapat memperpanjang retensi antibiotik dan memperkuat penyebaran gen resistensi. Tang dan Li (2024) menunjukkan bahwa aging mikroplastik dapat mengubah luas permukaan, gugus fungsi, morfologi, kekasaran, dan kemampuan sorpsi sehingga interaksi mikroplastik dengan antibiotik, biofilm, dan ARG menjadi lebih kuat. Gross et al. (2025) membuktikan bahwa ukuran, komposisi, konsentrasi, dan sifat permukaan mikroplastik memengaruhi pembentukan biofilm dan multidrug resistance pada bakteri model. Balta et al. (2025) dan Piergiacomo et al. (2023) memperluas penjelasan ini melalui hubungan mikroplastik, logam berat, *co-selection*, *cross-resistance*, *xenobiotic contaminants*, dan *One Health*. Oleh karena itu, mekanisme mikroplastik sebagai reservoir ARG bersifat multidimensi karena melibatkan permukaan material, biofilm, adsorpsi kontaminan, tekanan selektif, dan pertukaran genetik.

b. Faktor Yang Memengaruhi Mikroplastik Sebagai Hotspot Biofilm Dan Reservoir Gen Resistensi Antibiotik

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kemampuan mikroplastik sebagai *hotspot* biofilm dan reservoir ARG dipengaruhi oleh faktor material dan faktor lingkungan. Faktor material meliputi jenis polimer, ukuran, bentuk, konsentrasi, komposisi, kekasaran permukaan, hidrofobisitas, *eco-corona*, dan aging. Pham et al. (2021) menunjukkan bahwa PE dan PS dalam *activated sludge* dapat memperkaya *sul1*, *sul2*, *intI1*, serta taksa patogen dan ARB. Tran et al. (2025) menunjukkan bahwa PET, PE, PLA, dan PVC-A dapat menghasilkan profil bakteri dan ARG yang berbeda pada inlet, outlet, dan lokasi IPAL yang berbeda. Wang et al. (2024) menambahkan bahwa keragaman mikroplastik dapat meningkatkan kelimpahan ARG, VFG, dan MGE, meskipun konteks studinya berada pada tanah. Faktor lingkungan meliputi antibiotik, logam berat, disinfektan, COD, TP, salinitas, konduktivitas listrik, waktu paparan, kedalaman, dan komposisi komunitas mikroba lokal. Perveen et al. (2023) menunjukkan bahwa waktu kolonisasi dan TOC memengaruhi dinamika ARB dan ARG dalam biofilm mikroplastik dari efluen WWTP. Maday et al. (2024) juga menunjukkan bahwa waktu paparan, kedalaman, dan kondisi kolam maturasi IPAL dapat memengaruhi struktur komunitas biofilm pada plastik.

Pembahasan atas faktor tersebut memperlihatkan bahwa mikroplastik tidak dapat diperlakukan sebagai satu kelompok material yang seragam. Setiap polimer memiliki sifat permukaan, kemampuan sorpsi, daya apung, dan

potensi kolonisasi yang berbeda. Mikroplastik yang mengalami aging cenderung memiliki permukaan lebih kasar, gugus fungsi lebih beragam, dan luas permukaan lebih besar, sehingga lebih mudah ditempeli mikroba dan kontaminan. Kondisi air limbah juga memperkuat peran mikroplastik karena IPAL menerima antibiotik, logam berat, disinfektan, personal care products, obat non-antibiotik, bahan organik, dan polutan lain dari berbagai sumber. Zhao, Yu, dan Zhang (2023) menunjukkan bahwa berbagai kontaminan tersebut dapat menjadi *antibiotic resistance drivers* pada *urban wastewater treatment plants*. Zhang, Liu, Ye, et al. (2026) memberi bukti yang sangat kuat karena menemukan bahwa COD, TP, konduktivitas listrik, keragaman bakteri, dan keragaman jamur berkorelasi dengan ARG atau MGE pada plastisphere PLA dan PET. Hasil tersebut memperjelas bahwa kemampuan mikroplastik sebagai hotspot tidak hanya ditentukan oleh keberadaan partikel, tetapi juga oleh kondisi kimia, biologis, dan operasional IPAL. Dengan demikian, penelitian ini menegaskan bahwa risiko mikroplastik berbiofilm perlu dianalisis berdasarkan kombinasi jenis mikroplastik, kualitas air limbah, tekanan selektif, unit proses, dan waktu paparan.

c. Implikasi Mikroplastik Berbiofilm Terhadap Penyebaran Resistensi Antibiotik Dan Strategi Pengendalian

Hasil sintesis menunjukkan bahwa mikroplastik berbiofilm memiliki implikasi penting terhadap penyebaran resistensi antibiotik di dalam dan di luar IPAL. Drane et al. (2024), Uluseker et al. (2021), Sambaza dan Naicker (2023), serta Zhao, Yu, dan Zhang (2023) menempatkan IPAL sebagai ruang yang menerima ARG, ARB, antibiotik, mikropolutan, logam berat, disinfektan, bahan organik, dan tekanan selektif lain. Bydalek et al. (2023) menunjukkan bahwa mikroplastik dalam WWTP dan *constructed wetland* dapat dikolonisasi biofilm, patogen, dan gen AMR, meskipun beban AMR dapat menurun setelah pengolahan. Perveen et al. (2023) menunjukkan bahwa biofilm mikroplastik dari efluen WWTP dapat mengakumulasi ARB, ARG, dan integron hingga hari ke-30. Zhang, Liu, Ye, et al. (2026) menunjukkan bahwa disinfeksi mampu menurunkan mikroba, ARG, dan MGE pada *wastewater*, tetapi dampaknya lebih kecil terhadap *plastisphere*. Witsø et al. (2025) juga menunjukkan bahwa *plastisphere* dari *wastewater* memiliki *resistome* lebih beragam dibandingkan *plastisphere* dari *freshwater*. Temuan tersebut memperlihatkan bahwa unit pengolahan IPAL dapat menurunkan sebagian risiko, tetapi mikroplastik berbiofilm tetap dapat mempertahankan ARG, ARB, patogen, dan MGE. Karena itu, efektivitas IPAL tidak cukup hanya diukur dari penurunan parameter konvensional, tetapi juga perlu dilihat dari kemampuan sistem mengendalikan mikroplastik berbiofilm dan ARG yang melekat pada partikel.

Implikasi berikutnya muncul setelah efluen IPAL masuk ke lingkungan penerima. Rossi et al. (2025) menunjukkan bahwa plastik di ekosistem akuatik dapat memperkaya ARG dan membawa risiko ke hewan akuatik, produk perikanan, dan rantai makanan. Alfonsi et al. (2025) menunjukkan bahwa *plastisphere* sungai dapat menjadi reservoir bakteri resisten antibiotik, termasuk bakteri multidrug resistant dan gen yang relevan secara klinis. Cholewińska et al. (2025) menunjukkan bahwa mikroplastik dapat meningkatkan patogen dan ARG pada air serta sedimen setelah inkubasi singkat. Raju et al. (2025) menegaskan perlunya surveilans ARG dalam sistem air limbah karena IPAL dapat menjadi simpul penyebaran AMR. Namun, Tulloch et al. (2024) memberi catatan kritis bahwa plastik tidak selalu memperkaya ARG ketika berpindah dari efluen WWTP ke air tawar, air payau, dan laut. Catatan ini penting karena menunjukkan bahwa risiko mikroplastik bersifat kontekstual dan dapat berubah akibat suksesi komunitas, kompetisi mikroba, jenis polimer, waktu paparan, dan kondisi lingkungan penerima. Dengan demikian, hasil penelitian ini tidak menyatakan bahwa semua mikroplastik selalu menjadi hotspot ARG, tetapi menunjukkan bahwa mikroplastik dapat menjadi hotspot ketika kondisi ekologis dan teknis mendukung.

DOI: <https://doi.org/10.69693/ijmst.v4i2.9445>

Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Strategi pengendalian dari perspektif teknik lingkungan perlu diarahkan pada pendekatan *multi-barrier*. Pendekatan ini penting karena mikroplastik berbiofilm dapat melewati beberapa tahapan pengolahan dan tetap membawa ARG pada efluen atau sludge. Bhardwaj et al. (2025) menunjukkan bahwa WWTP mampu mengurangi mikroplastik dalam jumlah besar, tetapi biofilm mikroplastik tetap dapat menjadi reservoir patogen dan resistensi antimikroba. Bydalek et al. (2023) menunjukkan bahwa kombinasi WWTP dan *constructed wetland* dapat menurunkan beban AMR, tetapi tidak menghilangkan risiko sepenuhnya. Brouwir et al. (2025) memberikan arah mitigasi melalui *constructed wetland*, *granular activated carbon*, dan ozonation plus GAC, meskipun fokusnya lebih luas pada antibiotik dan ARG. Strategi pengendalian juga perlu mencakup monitoring ARG, ARB, MGE, patogen, karakter mikroplastik, dan kualitas efluen. Evaluasi risiko perlu memasukkan jenis mikroplastik, aging, biofilm maturity, ARG profile, MGE, VFG, kualitas air, dan efektivitas tiap unit pengolahan. Dengan cara ini, IPAL dapat diposisikan sebagai titik intervensi strategis untuk menahan penyebaran resistensi antibiotik. Strategi ini juga mengarahkan pengelolaan IPAL agar tidak hanya berorientasi pada *removal* BOD, COD, TSS, dan nutrisi, tetapi juga pada pengendalian risiko mikrobiologis dan genetik.

d. Tabel Sintesis Hasil Dan Pembahasan

Sebelum hasil sintesis dibahas lebih lanjut secara naratif, temuan utama penelitian perlu diringkas dalam bentuk tabel agar hubungan antar isu dapat terlihat lebih jelas. Tabel sintesis berikut menyajikan pokok temuan dari literatur yang telah dianalisis, terutama terkait mekanisme pembentukan biofilm, faktor yang memengaruhi mikroplastik sebagai reservoir ARG, implikasi terhadap IPAL, serta strategi pengendalian dari perspektif teknik lingkungan. Penyajian dalam bentuk tabel bertujuan untuk memudahkan pembaca melihat pola utama dari 37 artikel yang dikaji. Selain itu, tabel ini juga membantu menunjukkan keterkaitan antara data utama yang ditemukan dengan makna ilmiah yang dibahas dalam penelitian. Dengan demikian, tabel sintesis tidak hanya berfungsi sebagai ringkasan hasil, tetapi juga sebagai dasar untuk memahami arah pembahasan pada bagian berikutnya.

Tabel 1. Sintesis Hasil Dan Pembahasan Peran Mikroplastik Sebagai Hotspot Biofilm Dan Reservoir Gen Resistensi Antibiotik Pada IPAL

No.	Fokus Hasil	Data Utama yang Ditemukan	Pembahasan dan Makna Ilmiah
1	<i>Plastisphere</i>	Mikroplastik membentuk komunitas mikroba khas yang berbeda dari sedimen, dan substrat alami.	<i>Plastisphere</i> menjelaskan posisi mikroplastik sebagai mikrohabitat aktif, bukan partikel pasif.
2	Tahap pembentukan biofilm	Biofilm terbentuk melalui adhesi mikroba, produksi EPS, pematangan, dan pelepasan mikroba.	Tahapan ini membuat mikroplastik menjadi ruang kolonisasi, proteksi, dan penyebaran mikroba.
3	ARB, patogen, dan MGE	Biofilm mikroplastik dapat membawa ARB, ARG, patogen, integron, plasmid, transposon, dan MGE lain.	Kombinasi ini menjelaskan mengapa mikroplastik dapat berperan sebagai reservoir resistensi antibiotik.
4	<i>Horizontal gene transfer</i>	Biofilm mendukung transformasi, transduksi, dan konjugasi karena sel bakteri hidup berdekatan.	Mikroplastik berbiofilm dapat menjadi ruang pertukaran genetik yang memperkuat penyebaran ARG.
5	Faktor material	Jenis polimer, ukuran, bentuk, kekasaran, hidrofobisitas, konsentrasi, komposisi, dan aging memengaruhi biofilm serta ARG.	Mikroplastik tidak dapat diperlakukan sebagai satu kategori tunggal karena setiap material memiliki risiko berbeda.
6	Faktor lingkungan	Antibiotik, logam berat, disinfektan, COD, TP, salinitas, waktu paparan, dan komunitas mikroba memengaruhi resistensi plastisphere.	Risiko muncul dari interaksi antara sifat partikel dan kondisi air limbah yang penuh tekanan selektif.
7	Unit proses IPAL	<i>Activated sludge</i> , <i>constructed wetland</i> , kolam maturasi, disinfeksi, efluen, dan proses.	Evaluasi IPAL perlu melihat setiap unit, bukan hanya kualitas akhir efluen.

No.	Fokus Hasil	Data Utama yang Ditemukan	Pembahasan dan Makna Ilmiah
		<i>sludge</i> menjadi titik penting dinamika mikroplastik berbiofilm.	
8	Disinfeksi	Disinfeksi menurunkan ARG pada wastewater, tetapi dampaknya lebih kecil terhadap ARG dalam <i>plastisphere</i> .	Biofilm mikroplastik dapat melindungi ARG dan mikroba dari proses eliminasi.
9	Lingkungan penerima	Mikroplastik dari efluen dapat membawa ARG, ARB, patogen, dan MGE ke sungai, sedimen, laut, organisme akuatik, dan rantai makanan.	Risiko mikroplastik berbiofilm melampaui batas IPAL dan terkait dengan kesehatan lingkungan.
10	Variasi antarstudi	Beberapa studi menunjukkan pengayaan ARG, tetapi Tulloch et al. (2024) menunjukkan bahwa plastik tidak selalu memperkaya ARG.	Peran mikroplastik sebagai hotspot bersifat kontekstual dan dipengaruhi oleh kondisi teknis serta ekologis.
11	Strategi pengendalian	Pengendalian mencakup removal partikel, pengolahan lanjutan, disinfeksi, monitoring ARG, dan pendekatan <i>multi-barrier</i> .	IPAL perlu dikembangkan sebagai sistem pengendalian risiko mikrobiologis dan genetik.
12	Kontribusi penelitian	Penelitian menyatukan mikroplastik, <i>plastisphere</i> , biofilm, ARG, ARB, MGE, tekanan selektif, dan unit IPAL.	Kontribusi utama terletak pada sintesis teknik lingkungan yang menghubungkan mekanisme mikrobiologi dengan desain dan operasi IPAL.

Berdasarkan tabel tersebut, dapat dilihat bahwa mikroplastik memiliki peran yang kompleks dalam sistem IPAL. Peran tersebut tidak hanya berkaitan dengan keberadaan partikel plastik, tetapi juga dengan proses biologis, kimia, dan teknis yang terjadi pada permukaannya. Temuan tentang *plastisphere*, pembentukan biofilm, akumulasi ARG, keberadaan MGE, serta ketahanan terhadap disinfeksi menunjukkan bahwa mikroplastik perlu dipahami sebagai komponen aktif dalam dinamika resistensi antibiotik. Namun, tabel juga menunjukkan bahwa peran mikroplastik sebagai hotspot tidak selalu bersifat mutlak, karena dipengaruhi oleh jenis polimer, kondisi lingkungan, waktu paparan, unit pengolahan, dan karakter komunitas mikroba. Oleh karena itu, pembahasan selanjutnya perlu diarahkan pada penjelasan yang lebih mendalam mengenai bagaimana temuan-temuan tersebut menjawab rumusan masalah penelitian. Pembahasan juga perlu menegaskan signifikansi temuan bagi pengembangan teknik lingkungan, khususnya dalam evaluasi dan pengendalian risiko resistensi antibiotik pada instalasi pengolahan air limbah.

e. Signifikansi, Kontribusi, Implikasi, Dan Batasan Penelitian

Signifikansi penelitian ini terletak pada perubahan cara memandang mikroplastik dalam sistem IPAL. Mikroplastik tidak lagi cukup dilihat sebagai pencemar fisik yang hanya perlu dihitung jumlah, ukuran, dan jenis polimernya. Hasil sintesis menunjukkan bahwa mikroplastik dapat menjadi substrat biofilm, pembawa kontaminan, reservoir ARG, ruang HGT, pelindung mikroba dari disinfeksi, dan jalur pelepasan resistensi antibiotik ke lingkungan. Kontribusi ilmiah penelitian ini berada pada penyatuan bukti yang sebelumnya tersebar dalam kajian AMR air limbah, *plastisphere* akuatik, eksperimen mikroplastik, proses IPAL, dan risiko lingkungan penerima. *Novelty* penelitian ini tampak pada integrasi mikroplastik, *plastisphere*, biofilm, ARG, ARB, MGE, tekanan selektif, dan unit IPAL dalam satu kerangka teknik lingkungan. Orisinalitasnya bukan pada klaim bahwa fenomena *plastisphere* baru ditemukan, tetapi pada cara menyusun bukti agar dapat menjelaskan kapan, bagaimana, di unit mana, dan dalam kondisi apa mikroplastik menjadi hotspot biofilm dan reservoir ARG. Kerangka ini penting karena membantu peneliti dan praktisi membedakan mikroplastik sebagai substrat kolonisasi

biasa, reservoir pasif, vektor transportasi, atau hotspot aktif. Dengan demikian, penelitian ini berkontribusi pada pengembangan teknik lingkungan yang lebih peka terhadap risiko resistome, bukan hanya pada indikator kualitas air konvensional.

Implikasi teoretis penelitian ini adalah penguatan konsep *plastisphere* sebagai ruang ekologis aktif dalam IPAL. Konsep ini menghubungkan adhesi mikroba, *eco-corona*, EPS, HGT, ARB, ARG, MGE, patogen, *co-selection*, dan *resistome* dalam satu jalur penjelasan. Implikasi praktisnya adalah perlunya evaluasi IPAL berbasis risiko. Evaluasi tersebut perlu memasukkan karakter mikroplastik, kematangan biofilm, profil ARG, keberadaan MGE, VFG, kualitas air, serta efektivitas setiap unit pengolahan. Monitoring juga perlu diperluas dari indikator mikrobiologi konvensional menuju pemantauan ARG dan MGE pada efluen serta *sludge*. Selain itu, pengendalian sumber mikroplastik, antibiotik, logam berat, dan disinfektan perlu dilakukan secara bersamaan karena semua faktor tersebut dapat memperkuat tekanan selektif. Batasan penelitian ini terletak pada sifatnya sebagai *literature review*, sehingga hasil bergantung pada kualitas dan keterbandingan 37 artikel yang dikaji. Keterbatasan lain muncul dari variasi desain penelitian, lokasi, jenis polimer, metode deteksi, target gen, matriks sampel, dan konteks lingkungan, sehingga hasil sintesis tidak dapat disamaratakan untuk semua IPAL tanpa mempertimbangkan kondisi teknis setempat.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menyimpulkan bahwa mikroplastik pada IPAL tidak hanya berperan sebagai pencemar fisik, tetapi juga sebagai substrat aktif bagi pembentukan biofilm atau *plastisphere*. Biofilm pada permukaan mikroplastik menyediakan ruang kolonisasi bagi ARB, ARG, patogen, dan MGE melalui proses adhesi mikroba, pembentukan *eco-corona*, produksi EPS, serta *horizontal gene transfer*. Temuan utama menunjukkan bahwa mikroplastik dapat menjadi reservoir gen resistensi antibiotik karena mampu membawa mikroba, menyerap antibiotik dan kontaminan lain, serta melindungi komunitas mikroba dari tekanan lingkungan. Dalam konteks IPAL, risiko ini menjadi penting karena sistem pengolahan air limbah menerima antibiotik, logam berat, disinfektan, bahan organik, patogen, dan berbagai polutan lain yang dapat memperkuat tekanan selektif. Hasil sintesis juga menunjukkan bahwa efektivitas IPAL tidak cukup dinilai dari penurunan BOD, COD, TSS, nutrisi, atau indikator mikrobiologi konvensional, tetapi perlu diperluas pada pemantauan mikroplastik berbiofilm, ARG, ARB, MGE, dan patogen. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada penyusunan kerangka teknik lingkungan yang menghubungkan mekanisme *plastisphere*, karakter mikroplastik, unit proses IPAL, resistensi antibiotik, dan risiko efluen dalam satu kajian terpadu. Dengan demikian, penelitian ini memperkuat posisi mikroplastik sebagai isu penting dalam teknik lingkungan, mikrobiologi lingkungan, dan pengendalian resistensi antibiotik berbasis *One Health*. Penelitian ini juga menegaskan bahwa peran mikroplastik sebagai hotspot biofilm dan reservoir ARG bersifat kontekstual. Mikroplastik tidak selalu menjadi hotspot resistensi antibiotik dalam semua kondisi, karena risikonya dipengaruhi oleh jenis polimer, ukuran, bentuk, aging, kekasaran permukaan, hidrofobisitas, COD, TP, salinitas, waktu paparan, disinfektan, logam berat, dan komposisi komunitas mikroba. Hal ini penting karena mencegah kesimpulan yang terlalu umum bahwa semua mikroplastik selalu memiliki tingkat risiko yang sama. Saran untuk penelitian masa depan adalah melakukan studi empiris berbasis IPAL skala penuh dengan membandingkan influen, lumpur aktif, sedimentasi, disinfeksi, efluen, *sludge*, dan unit *polishing*. Penelitian lanjutan juga perlu menggunakan metode deteksi yang lebih terstandar, seperti qPCR, metagenomik, analisis resistome, dan pemetaan MGE agar hasil antartudi lebih mudah dibandingkan. Selain itu, kajian berikutnya perlu menilai efektivitas strategi *multi-barrier*, seperti *constructed wetland*, *granular activated carbon*, ozonation plus GAC, penguatan

DOI: <https://doi.org/10.69693/ijmst.v4i2.9445>

Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

removal partikel, dan monitoring ARG pada efluen serta *sludge*. Dengan arah tersebut, penelitian masa depan dapat menghasilkan dasar teknis yang lebih kuat bagi desain IPAL yang tidak hanya menurunkan pencemar konvensional, tetapi juga mengendalikan risiko mikroplastik berbiofilm dan penyebaran resistensi antibiotik.

References

- Alfonsi, S., Racciatti, F., Guzman, F., Fabbretti, A., Milon, P., Vitali, L. A., Spurio, R., & Petrelli, D. (2025). The Plastisphere And River Systems As Reservoirs For Antibiotic Resistant Bacteria. *Frontiers In Microbiology*, 16, 1721325. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1721325>
- Balta, I., Lemon, J., Gadaj, A., Cretescu, I., Stef, D., Pet, I., Stef, L., Mcleery, D., Douglas, A., & Corcionivoschi, N. (2025). The Interplay Between Antimicrobial Resistance, Heavy Metal Pollution, And The Role Of Microplastics. *Frontiers In Microbiology*, 16, 1550587. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1550587>
- Bhardwaj, G., Wankhede, L., Pulicharla, R., & Brar, S. K. (2025). Microplastic-Associated Biofilms In Wastewater Treatment Plants: Mechanisms And Impacts. *Journal Of Water Process Engineering*, 72, 107582. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107582>
- Bocci, V., Galafassi, S., Levantesi, C., Crognale, S., Amalfitano, S., Congestri, R., Matturro, B., Rossetti, S., & Di Pippo, F. (2024). Freshwater Plastisphere: A Review On Biodiversity, Risks, And Biodegradation Potential With Implications For The Aquatic Ecosystem Health. *Frontiers In Microbiology*, 15, 1395401. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1395401>
- Brouwir, L., Kleinjan, H., Balent, C., Quabron, G., Salmerón, I., Venditti, S., & Gritten, F. (2025). Fate And Removal Of Antibiotics And Antibiotic Resistance Genes In A Rural Wastewater Treatment Plant: A Microbial Perspective Of Nature-Based Versus Advanced Technologies. *Microorganisms*, 13(12), 2663. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13122663>
- Bydalek, F., Webster, G., Barden, R., Weightman, A. J., Kasprzyk-Hordern, B., & Wenk, J. (2023). Microplastic Biofilm, Associated Pathogen And Antimicrobial Resistance Dynamics Through A Wastewater Treatment Process Incorporating A Constructed Wetland. *Water Research*, 235, 119936. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119936>
- Cholewińska, P., Wojnarowski, K., Szeligowska, N., Pokorny, P., Hussein, W., Hasegawa, Y., Dobicki, W., & Palić, D. (2025). Presence Of Microplastic Particles Increased Abundance Of Pathogens And Antimicrobial Resistance Genes In Microbial Communities From The Oder River Water And Sediment. *Scientific Reports*, 15, 16338. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01136-6>
- Drane, K., Sheehan, M., Whelan, A., Ariel, E., & Kinobe, R. (2024). The Role Of Wastewater Treatment Plants In Dissemination Of Antibiotic Resistance: Source, Measurement, Removal And Risk Assessment. *Antibiotics*, 13(7), 668. <https://doi.org/10.3390/antibiotics13070668>
- Gross, N., Muhvich, J., Ching, C., Gomez, B., Horvath, E., Nahum, Y., & Zaman, M. H. (2025). Effects Of Microplastic Concentration, Composition, And Size On *Escherichia Coli* Biofilm-Associated Antimicrobial Resistance. *Applied And Environmental Microbiology*, 91(4), E02282-24. <https://doi.org/10.1128/Aem.02282-24>
- Hongjin, C., Rahman, S. U., Rehman, A., Khan, A. A., & Khalid, M. (2025). Microplastics And Antibiotic Resistance Genes As Rising Threats: Their Interaction Represents An Urgent Environmental Concern. *Current Research In Microbial Sciences*, 9, 100447. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2025.100447>
- Jia, J., Liu, Q., Zhao, E., Li, X., Xiong, X., & Wu, C. (2024). Biofilm Formation On Microplastics And Interactions With Antibiotics, Antibiotic Resistance Genes And Pathogens In Aquatic Environment. *Eco-Environment & Health*, 3(4), 516–528. <https://doi.org/10.1016/j.eehl.2024.05.003>
- Joannard, B., & Sanchez-Cid, C. (2024). Bacterial Dynamics Of The Plastisphere Microbiome Exposed To Sub-Lethal Antibiotic Pollution. *Microbiome*, 12, 97. <https://doi.org/10.1186/s40168-024-01803-2>
- Joo, S. H., Knauer, K., Su, C., & Toborek, M. (2025). Antibiotic Resistance In Plastisphere. *Journal Of Environmental Chemical Engineering*, 13(1), 115217. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.115217>
- Maday, S. D. M., Kingsbury, J. M., Weaver, L., Pantos, O., Wallbank, J. A., Doake, F., Masterton, H., Hopkins, M., Dunlop, R., Gaw, S., Theobald, B., Risani, R., Abbel, R., Smith, D. A., Handley, K., & Lear, G. (2024). Taxonomic Variation, Plastic Degradation, And Antibiotic Resistance Traits Of Plastisphere Communities In The Maturation Pond Of A Wastewater Treatment Plant. *Applied And Environmental Microbiology*, 90(10), E00715-24. <https://doi.org/10.1128/Aem.00715-24>
- Michaelis, C., & Grohmann, E. (2023). Horizontal Gene Transfer Of Antibiotic Resistance Genes In Biofilms. *Antibiotics*, 12(2), 328. <https://doi.org/10.3390/antibiotics12020328>
- Milani, G., Cortimiglia, C., Belloso Daza, M. V., Greco, E., Bassi, D., & Cocconcelli, P. S. (2024). Microplastic-Mediated Transfer Of Tetracycline Resistance: Unveiling The Role Of Mussels In Marine Ecosystems. *Antibiotics*, 13(8), 727. <https://doi.org/10.3390/antibiotics13080727>
- Perveen, S., Pablos, C., Reynolds, K., Stanley, S., & Marugán, J. (2022). Microplastics In Fresh- And Wastewater Are Potential Contributors To Antibiotic Resistance: A Minireview. *Journal Of Hazardous Materials Advances*, 6, 100071. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100071>
- Perveen, S., Pablos, C., Reynolds, K., Stanley, S., & Marugán, J. (2023). Growth And Prevalence Of Antibiotic-Resistant Bacteria In Microplastic Biofilm From Wastewater Treatment Plant Effluents. *Science Of The Total Environment*, 856, 159024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159024>
- Pham, D. N., Clark, L., & Li, M. (2021). Microplastics As Hubs Enriching Antibiotic-Resistant Bacteria And Pathogens In Municipal Activated Sludge. *Journal Of Hazardous Materials Letters*, 2, 100014. <https://doi.org/10.1016/j.hazl.2021.100014>
- Piergiacomo, F., Brusetti, L., & Pagani, L. (2023). Understanding The Interplay Between Antimicrobial Resistance, Microplastics And Xenobiotic Contaminants: A Leap Towards One Health? *International Journal Of Environmental Research And Public Health*, 20(1), 42. <https://doi.org/10.3390/ijerph20010042>
- Raju, N. P., Dhanorkar, M., & Singh, P. (2025). The Interplay Between Antimicrobial Resistance Genes And Emerging Contaminants In Wastewater Treatment Plants: Key Players In One Health. *Annals Of Microbiology*, 75, 14. <https://doi.org/10.1186/s13213-025-01814-W>
- Rossi, F., Santonicola, S., & Colavita, G. (2025). Enrichment Of Antibiotic Resistance Genes On Plastic Waste In Aquatic Ecosystems, Aquatic Animals, And Fishery Products. *Antibiotics*, 14(11), 1106. <https://doi.org/10.3390/antibiotics14111106>
- Sambaza, S. S., & Naicker, N. (2023). Contribution Of Wastewater To Antimicrobial Resistance: A Review Article. *Journal Of Global Antimicrobial Resistance*, 34, 23–29. <https://doi.org/10.1016/j.jgar.2023.05.010>

-
- Siddique, A., Hubab, M., Rasheela, A. R. P., Samad, R., Al-Ghouti, M., Sayadi, S., & Zouari, N. (2025). Microplastics And Their Role In The Emergence Of Antibiotic Resistance In Bacteria As A Threat For The Environment. *Environmental Chemistry And Ecotoxicology*, 7, 614–622. <https://doi.org/10.1016/J.Enceco.2025.03.006>
- Tang, K. H. D., & Li, R. H. (2024). Aged Microplastics And Antibiotic Resistance Genes: A Review Of Aging Effects On Their Interactions. *Antibiotics*, 13(10), 941. <https://doi.org/10.3390/Antibiotics13100941>
- Tran, T. T., Stenger, K. S., Strømmen, M., Bezuidenhout, C. C., & Wikmark, O.-G. (2025). Microplastic Categories Distinctively Impact Wastewater Bacterial Taxonomic Composition And Antimicrobial Resistance Genes. *Microorganisms*, 13(2), 260. <https://doi.org/10.3390/Microorganisms13020260>
- Tulloch, C. L., Bargiela, R., Williams, G. B., Chernikova, T. N., Cotterell, B. M., Wellington, E. M. H., Christie-Oleza, J. A., Thomas, D. N., Jones, D. L., & Golyshin, P. N. (2024). Microbial Communities Colonising Plastics During Transition From The Wastewater Treatment Plant To Marine Waters. *Environmental Microbiome*, 19, 27. <https://doi.org/10.1186/S40793-024-00569-2>
- Tuvo, B., Scarpaci, M., Bracaloni, S., Esposito, E., Costa, A. L., Ioppolo, M., & Casini, B. (2023). Microplastics And Antibiotic Resistance: The Magnitude Of The Problem And The Emerging Role Of Hospital Wastewater. *International Journal Of Environmental Research And Public Health*, 20(10), 5868. <https://doi.org/10.3390/Ijerp20105868>
- Uluşeker, C., Kaster, K. M., Thorsen, K., Basiry, D., Shobana, S., Jain, M., Kumar, G., Kommedal, R., & Pala-Ozkok, I. (2021). A Review On Occurrence And Spread Of Antibiotic Resistance In Wastewaters And In Wastewater Treatment Plants: Mechanisms And Perspectives. *Frontiers In Microbiology*, 12, 717809. <https://doi.org/10.3389/Fmicb.2021.717809>
- Wang, Y.-F., Liu, Y.-J., Fu, Y.-M., Xu, J.-Y., Zhang, T.-L., Cui, H.-L., Qiao, M., Rillig, M. C., Zhu, Y.-G., & Zhu, D. (2024). Microplastic Diversity Increases The Abundance Of Antibiotic Resistance Genes In Soil. *Nature Communications*, 15, 9751. <https://doi.org/10.1038/S41467-024-54237-7>
- Witso, I. L., Baral, A., Llaena, A.-K., Aspholm, M., Myrmel, M., & Wasteson, Y. (2025). Plasticspheres As Reservoirs Of Antimicrobial Resistance: Insights From Metagenomic Analyses Across Aquatic Environments. *PLOS ONE*, 20(9), E0330754. <https://doi.org/10.1371/Journal.Pone.0330754>
- Wu, L., Dong, J., Shen, Z., & Zhou, Y. (2024). Microplastics As Vectors For Antibiotic Resistance: Role Of Pathogens, Heavy Metals, And Pharmaceuticals And Personal Care Products. *Journal Of Water Process Engineering*, 67, 106124. <https://doi.org/10.1016/J.Jwpe.2024.106124>
- Zadjelovic, V., Wright, R. J., Borsetto, C., Quartey, J., Cairns, T. N., Langille, M. G. I., Wellington, E. M. H., & Christie-Oleza, J. A. (2023). Microbial Hitchhikers Harboring Antimicrobial-Resistance Genes In The Riverine Plasticsphere. *Microbiome*, 11, 225. <https://doi.org/10.1186/S40168-023-01662-3>
- Zhang, J., Liu, H., Ye, J., Jia, Q., Zhu, Y., Yi, Y., Li, Z., & Chen, Y. (2026). Plasticsphere Microbial Community And Functional Differences With Risk Of Antibiotic Resistance Gene Transmission Throughout Wastewater Treatment. *Water*, 18(5), 593. <https://doi.org/10.3390/W18050593>
- Zhang, X., Dong, Z., Zhang, S., Ma, J., & Liu, S. (2026). Microplastic Biofilm As Hotspots Of Antibiotic Resistance Genes And Potential Pathogens. *Npj Biofilms And Microbiomes*, 12, 24. <https://doi.org/10.1038/S41522-025-00890-9>
- Zhao, F., Yu, Q., & Zhang, X.-X. (2023). A Mini-Review Of Antibiotic Resistance Drivers In Urban Wastewater Treatment Plants: Environmental Concentrations, Mechanism And Perspectives. *Water*, 15(17), 3165. <https://doi.org/10.3390/W15173165>
- Zhao, K., Li, C., & Li, F. (2024). Research Progress On The Origin, Fate, Impacts And Harm Of Microplastics And Antibiotic Resistance Genes In Wastewater Treatment Plants. *Scientific Reports*, 14, 9719. <https://doi.org/10.1038/S41598-024-60458-Z>
-